

CONTRASTACIÓN DE MEDICIONES DE RADIACIÓN SOLAR EN SANTO DOMINGO CON UN SOLARÍMETRO DE CONSTRUCCIÓN SENCILA.

Sergio Vera¹, Ernesto Cyrulies¹, Rodolfo Echarri^{1,2}, Andrés Sartarelli¹, Inna Samsón³

¹Instituto de Desarrollo Humano, Universidad Nacional de General Sarmiento (IDH, UNGS)

J.M. Gutiérrez 1150 Los Polvorines, provincia de Buenos Aires. svera@ungs.edu.ar

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³INTEC (Instituto Tecnológico Santo Domingo. Rep. Dominicana)

FONDOCYT 2008-2-E1-010

RESUMEN

Se instaló un solarímetro de diseño propio en la sede del Instituto Tecnológico de Santo Domingo (República Dominicana). Allí se validaron los parámetros más apropiados para el método de Hottel en esa región y se calibró el instrumento. Se realizaron mediciones durante el primer semestre de 2010 para evaluar su desempeño. Los valores horarios se compararon con las curvas de Hottel y el comportamiento mensual se contrastó a partir de los valores del índice de claridad promedio mensual ($\overline{K_t}$) de los meses correspondientes con datos de heliofanía aportados por el servicio meteorológico dominicano. De manera auxiliar se evaluó el comportamiento del solarímetro en días de cielo claro comparando con el valor de K_c aportado por la bibliografía. Por último se analizaron los resultados.

Palabras clave: Radiación solar, Diseño, Solarímetro, Índice de claridad.

INTRODUCCIÓN

En nuestro proyecto sobre refrigeración solar por adsorción (Vera S. et al, 2008), resulta de gran utilidad conocer los valores tanto de irradiación como de irradiancia. Esto nos permite, por un lado, tomar decisiones para realizar mejoras en los sistemas de captación (colectores) y por el otro conocer datos horarios para profundizar el conocimiento de los procesos dinámicos del sistema. En otras palabras, conocer con más detalle las características locales del recurso solar (por ejemplo las fracciones directa y difusa) nos puede permitir escoger con más precisión el tamaño, la forma o tipo de colector. En ese marco, se decidió llevar a cabo el diseño, construcción y puesta en marcha de un solarímetro propio. (Al respecto puede verse Echarri R., et al, 2009).

Por otro lado, nuestro trabajo se desarrolla conjuntamente entre la UNGS (Bs. As.) y el INTEC (Instituto Tecnológico de Santo Domingo, República Dominicana) en donde en el mes de enero de 2010 se instaló otro solarímetro de construcción propia. Desde entonces se realizan mediciones de irradiancia cada dos minutos. En este trabajo, se analiza el comportamiento del instrumento para los meses de febrero, marzo y abril.

El primer solarímetro se construyó en el año 2008 a partir de un diseño propio (Sartarelli A., et al, 2010) y en este caso se hicieron algunas modificaciones respecto del anterior. En primer lugar se modificó la base, reemplazándola por un disco (inferior) de cobre. El objetivo de dicho cambio fue disminuir la inercia térmica del aparato para obtener un tiempo de respuesta menor. En segundo lugar se mejoró el contacto entre los sensores y los discos, ya que en la experiencia brindada por el solarímetro construido anteriormente se evidenció cierta deficiencia. Por último, se cambió la forma de anclaje entre los discos y la barra calibrada, reemplazando los terminales roscados por remaches. En la figura 1 se puede observar un esquema y una foto del nuevo dispositivo.

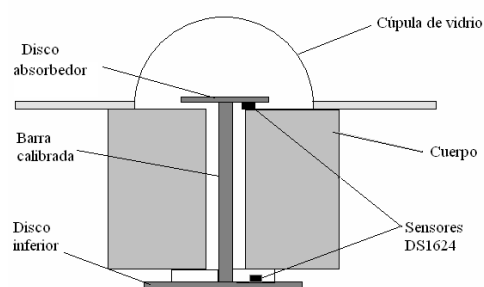


Figura 1: Esquema y foto del solarímetro.

AJUSTE DEL INSTRUMENTO

Para la calibración (Echarri et al, 2009) se realizó una vez más la comparación con la curva teórica de irradiancia obtenida con el método de día claro Hottel (Hottel H. C., 1976). Este método permite estimar la radiación global para condiciones de atmósfera clara, según la latitud, la altura del lugar y las características del clima. Estas últimas tienen gran incidencia en la transmitancia atmosférica y la forma de cuantificarla es a partir de los parámetros r_0 , r_1 y r_k . En la siguiente tabla se muestran los valores de los coeficientes utilizados en dicho método:

Tipo de clima	r_0	r_1	r_k
Tropical	0,95	0,98	1,02
Verano latitud media	0,97	0,99	1,02
Verano sub-ártico	0,99	0,99	1,01
Invierno latitud media	1,03	1,01	1,00

Tabla 1: Valores típicos de los coeficientes de ajuste según Hottel.

Para corroborar la validez de los valores teóricos de irradiancia calculados con el método propuesto por Hottel, se decidió realizar una calibración previa en Buenos Aires. En la figura 2 se muestra una de las rectas de calibración obtenida para el día 17 de enero de 2010. Para el ajuste se utilizó el programa Origin 6.0.

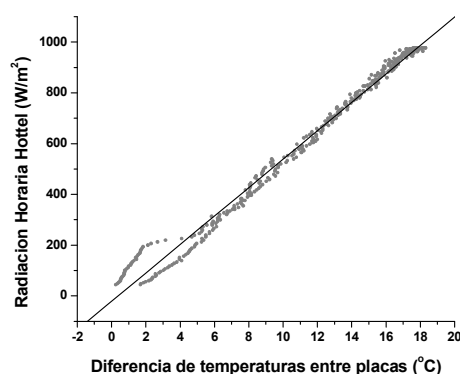


Figura 2: Calibración 17 de enero de 2010.

El resultado es:

$$I(\Delta T) = (56,72 \pm 0,31) W/m^2 \cdot ^\circ C * \Delta T - (10,73 \pm 3,90) W/m^2 \quad (1)$$

Donde $I(\Delta T)$ representa la irradiancia en función de la diferencia de temperaturas ΔT entre las placas del solarímetro. El valor del coeficiente de correlación lineal para esta recta es de 0.994. A continuación se muestran las curvas comparativas de los valores obtenidos para el 17 de Enero de 2010 con el solarímetro y la curva de Hottel.

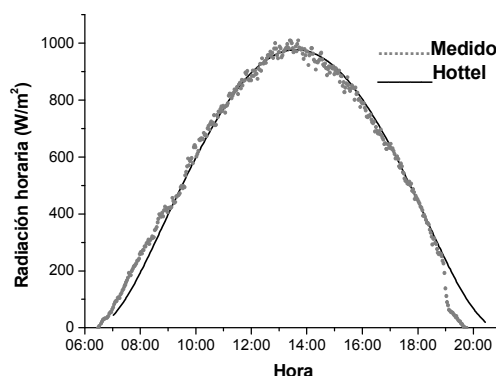


Figura 3: Comparación de curvas 17 enero de 2010

Utilizando esa calibración se realizaron las primeras mediciones en Santo Domingo para contrastarlas con las curvas teóricas obtenidas mediante el uso de planilla electrónica y se pudo determinar un grado de ajuste satisfactorio cuando se utilizaron

los parámetros r_0 , r_1 y r_k , indicados para tipo de clima “tropical” (latitud 18,5°, longitud 69,9° y 0,065 Km. SNM). En la figura 4 se puede observar la comparación para el día 9 de febrero de 2010:

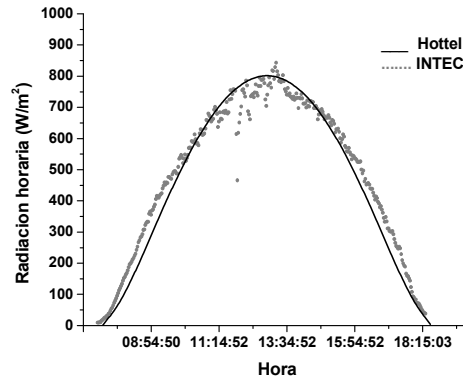


Figura 4: Comparación de curvas para el 9 de febrero de 2010.

Aunque el ajuste es razonable, se observaron desviaciones entre los valores de radiación teóricos y medidos. Por ello se realizó una inspección del terreno en búsqueda de posibles sombras o reflejos que modificaran, por ejemplo, los valores de la fracción difusa. Este último análisis arrojó un resultado negativo, por lo que se decidió recalibrar el equipo en el INTEC.

$$I(\Delta T) = (55,42 \pm 0,29) W/m^2 C * \Delta T - (54,02 \pm 3,53) W/m^2 \quad (2)$$

En este caso se encontró que el ajuste mejora cuando los datos experimentales son contrastados con la curva teórica aplicándole los parámetros de clima tropical, con un coeficiente de correlación lineal de 0,997. Como puede observarse en la figura 5, para la determinación de la recta, se dejaron de lado ciertos valores correspondientes a la zona donde se presentó nubosidad.

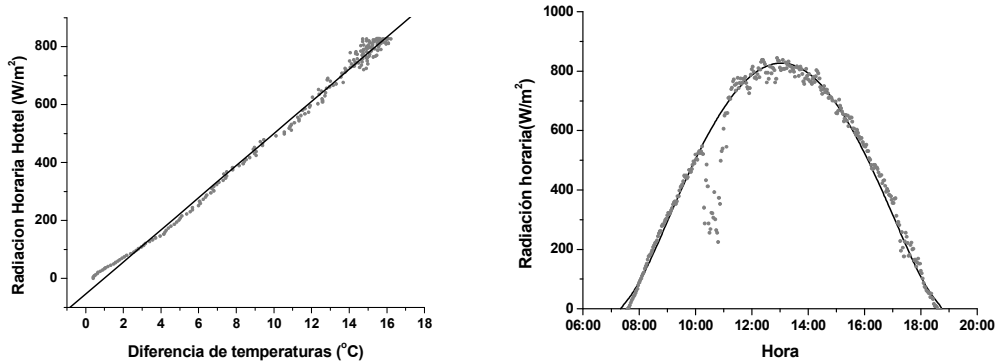


Figura 5: Calibración y comparación de curvas en el INTEC para el día 17/02/2010

En la recta de la figura 5 se puede apreciar un apartamiento en la linealidad en los valores de irradiancia por debajo de los 100 W/m², que se corresponde con un valor de ΔT de 2,8°C. En consecuencia se establece un rango de validez para la ecuación 3 de $\Delta T \geq 2,80^\circ C$.

Posteriormente se realizó una última calibración en donde se consideraron las fracciones posibles de cielo claro de todos los días del mes de febrero, se las promedió y con esos datos, más la curva de Hottel determinada para el día medio mensual respectivo, se obtuvo una recta de calibración promedio. En este caso el ajuste resulta muy satisfactorio con un valor de R^2 de 0.997. El valor de la recta obtenida, que se considera como la más apropiada y la que se utilizó para la obtención de resultados finales, es:

$$I(\Delta T) = (56,48 \pm 2,49) W/m^2 C * \Delta T - (58,18 \pm 2,93) W/m^2 \quad (3)$$

Por otro lado y aplicando el mismo método se llevó a cabo la comparación para el mes de marzo (fig.6) y se obtuvo un resultado similar al anterior, la correspondiente recta es:

$$I(\Delta T) = (56,48 \pm 0,27) W/m^2 C * \Delta T - (78,17 \pm 2,93) W/m^2 \quad (4)$$

Como se puede observar en las expresiones (3) y (4), la pendiente en ambos casos es idéntica y sólo se observa una diferencia de 20 W en la ordenada al origen.

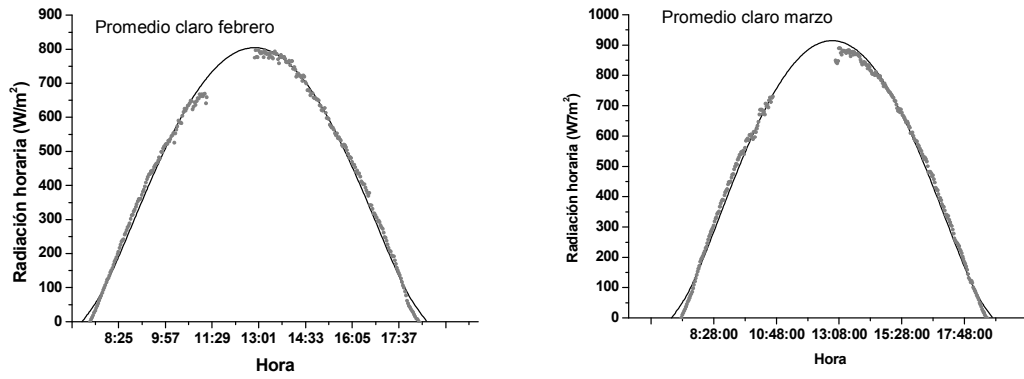


Figura6: Comparación para los meses de febrero y marzo de 2010.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta consistió en comparar, por un lado, las curvas obtenidas con las de referencia (Hottel). Se eligieron para tal fin dos días de cada mes separados por períodos de entre 10 y 20 días. Por otro lado se compararon los valores del índice de claridad medio mensual \overline{Kt} obtenidos a partir de las mediciones realizadas y el correspondiente valor determinado por el servicio meteorológico dominicano a partir de datos de heliofania.

Veamos algunas consideraciones que se tuvieron en cuenta para la evaluación de los errores. Como indicador del desvío en las mediciones, se definió el error porcentual $\sigma_{\%}$ como el promedio de las desviaciones relativas (ecuación 5), que caracteriza el grado de ajuste entre la curva teórica y la determinada con el solarímetro, considerando a la primera como el conjunto de valores más probables.

$$\sigma_{\%} = \sqrt{\frac{\sum_i^n \left(\frac{I_i - I_{Hi}}{I_{Hi}} \right)^2}{n}} \quad (5)$$

Donde:

I , irradiancia determinada con el instrumento; I_{Hi} , irradiancia estimada con Hottel y n número de mediciones.

Para la estimación del índice de claridad medio mensual se determinó, en primer lugar, el valor promedio diario a partir de los datos de la irradiancia global I y los valores horarios de la irradiancia a tope de atmósfera I_0 (Salazar G. A. et al, 2008), según la relación:

$$Kt = \frac{\sum_i^n I_i}{\sum_i^n I_{0i}} \quad (6)$$

En esta expresión Kt se refiere al índice promedio diario.

El error en la determinación del índice Kt será:

$$\Delta Kt = \frac{\sum_i^n \sigma_{\%i} I_i}{\sum_i^n I_{0i}} = \sigma_{\%} Kt \quad (7)$$

La irradiancia a tope de atmósfera se calculó mediante el uso de planilla electrónica utilizando la expresión:

$$\Delta Kt = I_{cs} \left[1 + 0,033 \cos \frac{2\pi}{365} N \right] \cos \theta_z \quad (8)$$

Donde:

I_{cs} es la constante solar (1367 W/m²)

N día juliano.

$\cos \theta_z$ es el coseno del ángulo cenital.

Una vez estimado el valor de Kt para cada uno de los días se obtiene el valor representativo para cada mes analizado, con la expresión:

$$\overline{Kt} = \frac{\sum_{i=1}^n Kt_i}{n} \quad (9)$$

En la que \overline{Kt} representa el promedio mensual del índice de claridad. Por otro lado, los valores de referencia para la transmitancia atmosférica, fueron brindados por el Lic. Hugo Segura de la oficina central del Servicio Meteorológico Nacional de la República Dominicana. Estos datos fueron extraídos de la tesis “Estimación de la radiación solar en sus diferentes componentes para una superficie inclinada y orientada” (Landa F.M. y Méndez Tejeda R. B., 1983) de la Universidad Autónoma de Santo Domingo. En el citado trabajo los autores presentan los valores de los mencionados índices para la región central (que incluye a la ciudad de Santo Domingo) a partir de series temporales de horas de insolación durante ocho años. Para las mediciones de radiación se utilizó un Heliógrafo del tipo Campbell-Stokes y la aplicación de la ecuación de Angström-Prescott con sus respectivos coeficientes regionales, por un lado y los datos provenientes de veinte estaciones provistas con piranógrafos del tipo Robitzsch, por el otro.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Durante el período en el que se llevaron a cabo las mediciones, no se observaron muchos días de cielo despejado. Por ello se decidió buscar un indicador de más largo plazo para establecer el comportamiento mensual de nuestro solarímetro, dado que la comparación diaria de los valores de irradiancia obtenidos podría resultar un tanto imprecisa. No obstante los días elegidos para la comparación de los valores obtenidos con los estimados permiten observar el desempeño del instrumento a lo largo del período estudiado, como se observa en la figura 7. Por un lado se puede apreciar la estabilidad en las mediciones y por el otro, la validez de su calibración durante un lapso de 5 meses, ya que si bien hay mucha presencia de nubosidad, en todos los casos aparecen zonas de cielo despejado y para esos valores el ajuste es razonable.

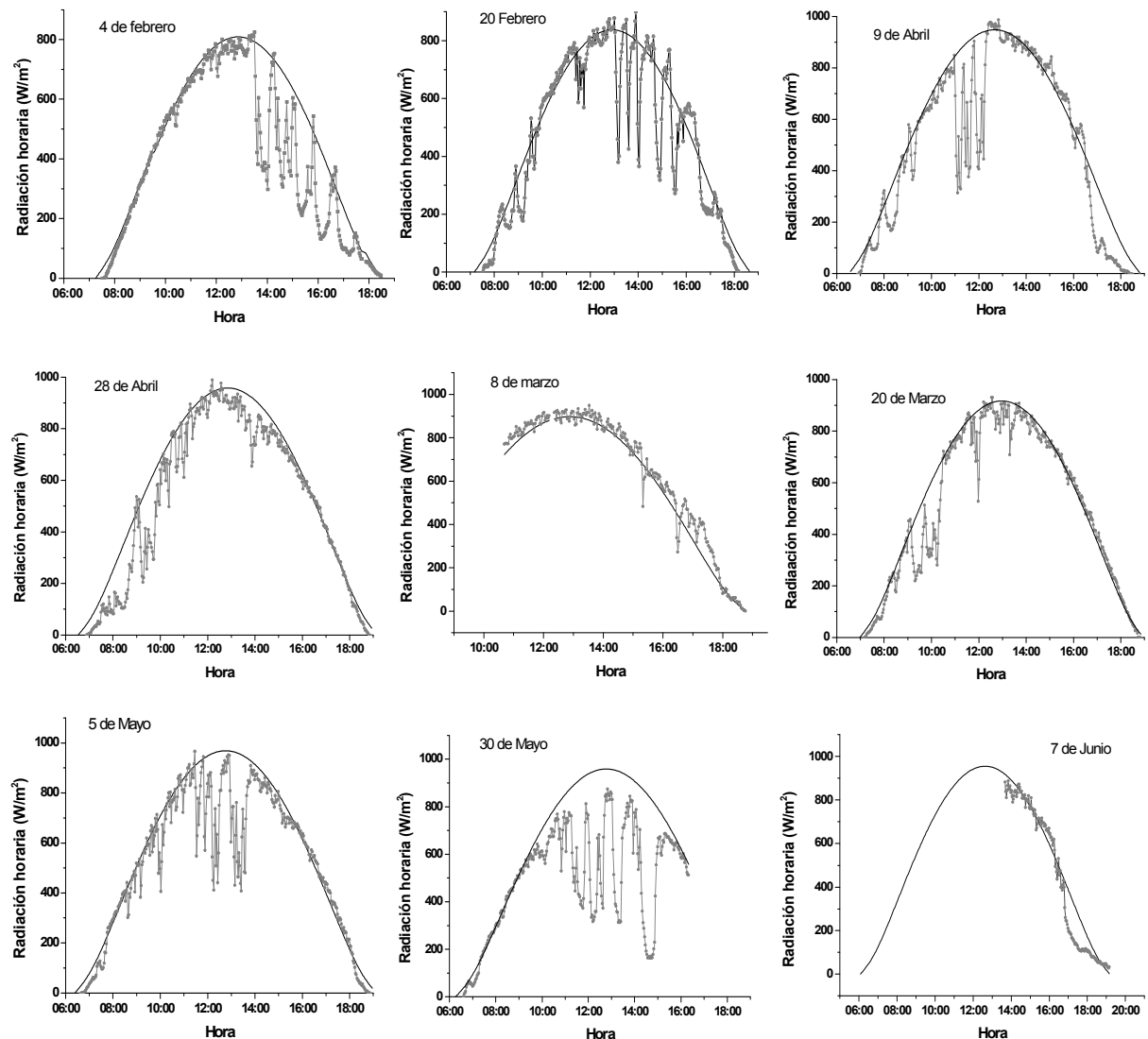


Figura 7: Curvas representativas de varios día de medición entre los meses de febrero y junio de 2010.

Un hecho a destacar es que la modificación realizada en el disco inferior (es mucho menos masivo que en la versión anterior) no parece ser la más apropiada. Se observó que, incluso en periodos de cielo claro, los valores de irradiancia obtenidos mostraron oscilaciones de entre 5 y 40 W/m². Esto se debe probablemente a pequeñas variaciones en su temperatura ocasionadas por ráfagas de viento. Incluso el efecto puede verse incrementado por el tiempo de respuesta del instrumento con un valor de aproximadamente 100 segundos (Echarri R. et al, 2008).

Es importante aclarar que aunque el instrumento no cuente con una doble cúpula de vidrio, éste no es el factor de mayor influencia en las oscilaciones observadas. En relación a otros solarímetros, en el nuestro no importa tanto el enfriamiento del disco superior, como la diferencia en la velocidad de enfriamiento entre los dos discos cuando el instrumento es sometido a una ráfaga de viento. Debido a eso sería contraproducente colocar una doble cúpula como es usual.

Para mejorar el comportamiento frente al viento, se está estudiando un diseño del disco inferior para que su enfriamiento tenga aproximadamente la misma respuesta temporal que el disco superior en la cúpula, para velocidades típicas del viento de la zona donde está instalado.

Al evaluar la recta de calibración (3) con el conjunto de datos promediados provenientes del solarímetro para los días o sus fracciones de cielo claro durante el mes de marzo, el error porcentual ($\sigma\%$) es de alrededor del 7,5 %. El error sólo pudo estimarse en días despejados debido a que nuestro patrón de calibración fue la curva de Hottel.

Como se mencionó anteriormente, se decidió comparar los valores de índice de transmitancia atmosférica para los meses ensayados. En la figura 8 se puede observar los valores obtenidos de Kt para los días de marzo de 2010 en los que se realizaron mediciones. A partir de los datos diarios se utilizó la expresión (7) para determinar el valor medio mensual del índice de transmitancia atmosférica en los meses de febrero, marzo y abril.

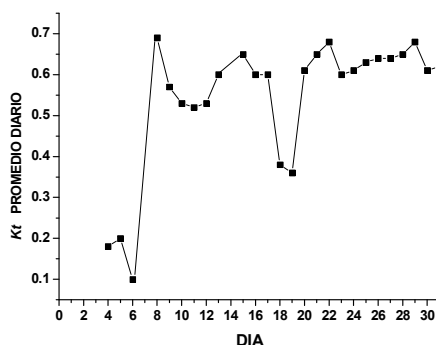


Figura 8: Valores de índice de claridad Kt obtenidos para el mes de Marzo.

Cuando se comparan los datos de referencia con los valores medios obtenidos (tabla 2) se observa una buena correlación, en particular para los meses de febrero y marzo. En el caso del mes de abril se aprecia un alejamiento entre los valores. Esto se puede explicar a partir de cierta irregularidad climática para el mes mencionado, en el que se observó una cantidad de precipitaciones y nubosidad mayor a la esperada. Si bien la época de lluvias comienza a mediados de marzo, los meses anteriores presentaron una tendencia de precipitaciones menor de la media. Esto, posiblemente, pueda observarse en el valor medio del índice de claridad obtenido para febrero con un valor levemente mayor al esperado.

	\overline{Kt}_{ref}	\overline{Kt}	$\Delta \overline{Kt}$
Febrero	0.550	0.570	0.042
Marzo	0.540	0.540	0.040
Abril	0.530	0.470	0.035

Tabla 2: comparación de los valores Kt medio mensual.

En los días de baja intensidad de radiación solar, los valores determinados pueden presentar mayores diferencias con los reales debido al apartamiento de la linealidad del instrumento en esa zona. Dado que el rango de validez del instrumento se estableció a partir de los 100W/m², los valores obtenidos para días nublados resultan aproximados. Sería fundamental entonces, realizar la contrastación de nuestro solarímetro con un instrumento absoluto, sobre todo en las jornadas de baja irradiancia.

Un último criterio de evaluación del comportamiento mensual surge de la comparación de los valores de \overline{Kt} obtenidos con los datos de las curvas promedio claro de febrero y marzo con el índice medio de claridad de días claros \overline{Kc} . En el modelo presentado por Suerhcke para la estimación del valor medio mensual de irradiancia global diaria, (Grossi Gallegos H., et al) se propuso para \overline{Kc} un valor medio de 0,7. En nuestro caso para febrero y marzo (promedio claro) se obtuvieron los valores de 0,7 y 0,69 respectivamente. Entonces, aceptando como el valor más representativo del índice de claridad para días de cielo

claro el propuesto en la literatura, se encuentra un acuerdo satisfactorio en las mediciones realizadas, en particular, cuando el cielo está despejado.

CONCLUSIONES

Se instaló un solarímetro de diseño y construcción propios en el INTEC de Santo Domingo, en donde se realizaron mediciones en el período febrero junio. Los resultados fueron los esperados con un error porcentual del orden del 7%, tanto para valores diarios como para promedios mensuales cuando se compararon los valores de Kt obtenidos con los aportados por el Servicio Meteorológico Dominicano. De la comparación de los valores de índice de transmitancia atmosférico obtenidos para día claro (0,7 y 0,69) con el encontrado en la bibliografía (0,7) surge que su desempeño en estas condiciones es muy satisfactorio. Respecto de la modificación en el disco inferior, se encontró que no es la mejor opción ya que en las mediciones se observó mucho ruido, probablemente por variaciones repentinas de su temperatura causadas por el viento.

REFERENCIAS

Echarri R., Vera S., Cyrulies E., Sartarelli A., Samson I. (2009). Estudio del comportamiento de un solarímetro de bajo costo” Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 13, pp. (08.113-08.119).

Grossi Gallegos H, Richijk C, (2008). VI curso de aprovechamiento energético de la radiación solar. UNLu. pp. 35- 51.

Hottel, H. C. (1976). A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. Solar Energy, 18, 129.

Landa F.M., Mendez Tejeda R. B., (1983). Estimación de la radiación solar en sus diferentes componentes para una superficie inclinada y orientada. Tesis de licenciatura de la Universidad Autónoma de Santo Domingo. pp. 28-69.

Salazar G. A., Hernandez A., Cadena C., Saravia L. R., Romero G. G., (2008). Caracterización de valores de radiación solar global para día claro en sitios de altura en el noroeste de la república argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 12 pp. (11.33-11.40).

Sartarelli A., Vera S., Echarri R., Cyrulies E., Samsón I., (2010). Heat flux solarimeter. Solar Energy. DOI: 10.1016/J.Solener. 2010. 08.09. (en prensa).

Vera S., Echarri R., Sartarelli A., Cyrulies E., Samsón I. (2008). Construcción de una heladera solar por adsorción. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 12. pp. (03.01-03.05).

ABSTRACT

We have installed a solarimeter designed and built by us in the INTEC (Rep. Dominic). In that place the appropriate parameters were validated for the Hottel's clear day method and using it the instrument was calibrated. Measurements were performed during the first half of 2010 to evaluate its performance. The hourly values were compared with the curves of Hottel and behavior was tested monthly from the values of clarity index monthly average (Kt) of the corresponding months of heliophany data provided by the Dominican National Weather Service. In an ancillary manner, the performance of the solar meter in clear sky days was compared to the value provided by the literature Kc . Finally the results were analyzed.

Keywords: solar radiation, design, solarimeter, clarity index.